引用格式：张越, 余江, 杨娅, 等. 颠覆性技术驱动的未来产业培育模式与路径研究——美国布局下一代集成电路产业的启示. 中国科学院院刊, 2023, 38(6): 895-906
Zhang Y, Yu J, Yang Y, et al. Cultivation mode and path of future industries driven by disruptive technologies—Enlightenment of the United States' layout of next generation of integrated circuit industry. Bulletin of Chinese Academy of Sciences, 2023, 38(6): 895-906

颠覆性技术驱动的未来产业培育模式与路径研究

——美国布局下一代集成电路产业的启示

张 越[1,2]　余 江[1,2*]　杨 娅[1,2]　陈 凤[2]
1 中国科学院科技战略咨询研究院 北京 100190
2 中国科学院大学 公共政策与管理学院 北京 100049

摘要 颠覆性技术对未来产业发展的路径、方向和国际竞争格局具有关键影响。因此，前瞻布局颠覆性技术驱动的未来产业是我国抢占科技制高点、加快构建新发展格局的必然选择。文章对美国“电子复兴计划”布局颠覆性技术、培育未来产业的技术识别机制、组织管理机制、评价机制和示范应用机制进行了全流程、全链条的深度分析，提炼颠覆性技术和未来产业科学内涵、关键要素，并从“颠覆性技术供给—技术产业转化—技术产业应用”环节构建了“颠覆性技术驱动的未来产业培育模式”研究框架；相关研究发现对我国培育颠覆性技术驱动的未来产业具有关键借鉴意义。文章提出我国应面向未来产业建立长期、动态的颠覆性技术甄别与支持机制；进一步加强市场导向、多元参与的管理模式与政策设计，建立多种技术路线并行的颠覆性技术动态比较与竞争退出机制；包容由于技术研发、技术路线等客观因素导致的失败，形成与关键核心技术攻关的“揭榜挂帅”相差异化的考核评价机制；完善面向未来产业应用场景的颠覆性技术示范应用，推动未来产业先导示范区等试点示范与应用场景探索。

关键词 颠覆性技术，未来产业，电子复兴计划，前沿布局路径

当前世界经济和科技竞争日趋激烈，我国正处于转变发展方式、转化增长动力、优化经济结构的关键时期，亟待技术进行前瞻性、引领性和原创性突破。随着我国开启全面建设社会主义现代化国家新征程，

*通信作者
资助项目：中国科学院青年创新促进会会员项目（E3X06816），国家自然科学基金重点项目（NSFC71834006），教育部哲学社会科学研究重大课题攻关项目（20JZD022），国家自然科学基金青年科学基金项目（NSFC72104227）
修改稿收到日期：2023年6月9日

坚持新发展理念、构建新发展格局，积极布局前沿技术已经成为“十四五”时期经济社会发展的关键战略。《中华人民共和国国民经济和社会发展第十四个五年规划和2035年远景目标纲要》提出，“加强前沿技术多路径探索、交叉融合和颠覆性技术供给。实施产业跨界融合示范工程，打造未来技术应用场景，加速形成若干未来产业”。在我国部分领域进入世界前列的背景下，前瞻谋划颠覆性技术驱动的未来产业，探索“无人区”技术突破，是我国把握产业发展主导权和控制权的重要前提[1]。

培育颠覆性技术驱动的未来产业能够提升我国产业发展的长期竞争力。一方面，颠覆性技术具有破坏性和变革性特点，探索了技术新路径、支撑了产品新形态进而催生了新产品、新需求与新业态，通过解决未来产业发展面临的瓶颈，更有可能推动未来产业从理论构想的孕育孵化阶段进入技术产业化阶段。另一方面，布局颠覆性技术驱动的未来产业有助于我国抢抓国际竞争的新机遇。当前，美国、英国、德国、法国、日本等国际领先国家纷纷开始布局未来产业，一旦某一国家依托颠覆性技术突破实现产业化，我国不能及时识别与跟进，有可能错失未来产业关键领域发展的战略机遇。

为掌握未来经济发展的主动权，各地方政府高度重视发展颠覆性技术，将未来产业视为“十四五”时期抢占区域发展制高点的重要领域。《北京市国民经济和社会发展第十四个五年规划和二〇三五年远景目标纲要》明确提出要布局量子信息、新材料、人工智能、卫星互联网、机器人等未来产业；《深圳市国民经济和社会发展第十四个五年规划和二〇三五年远景目标纲要》将前瞻布局6G通信网络、量子科技、深海深空、氢能产业等前沿技术创新领域；《杭州市人民政府关于加快推动杭州未来产业发展的指导意见》，将人工智能、虚拟现实、区块链、量子技术、增材制造、商用航空航天、生物技术和生命科学等作为率先探索布局的行业领域，并布局专业人才、专项资金等工作；《重庆市战略性新兴产业发展“十四五”规划纲要》中将卫星互联网、氢能与储能、生物育种与生物制造、脑科学与类脑智能等产业作为提升未来竞争力、把握发展新趋势的先导性产业。地方政府超前布局颠覆性前沿技术，有望在这些新兴技术领域形成一批未来产业集群，通过挖掘新潜力、创造新增量、带动新就业等，推动新一轮经济增长。

前瞻布局颠覆性技术驱动的未来产业，既是我国进入新发展阶段、加快构建新发展格局的客观需要，也是培育新兴接续产业、抢占全球科技产业竞争制高点的必然选择。本文从颠覆性技术的科学内涵与基本特征出发，通过对美国“电子复兴计划”的系统梳理，厘清颠覆性技术驱动的未来产业培育的着力点，凝练我国依托颠覆性技术突破培育未来产业的机制与路径。

1 美国依托颠覆性技术培育未来产业的模式研究——“电子复兴计划”

在全球数字化即将发生变革的新时期，美国为继续强化电子信息技术优势，捍卫全球领导地位，美国国防高级研究计划局（DARPA）于2017年6月，以推动材料和集成、系统架构、电路设计三大领域创新为核心发展思路，从集成电路全产业链谋划布局的“电子复兴计划”[2]。“电子复兴计划”主要包括3类项目：① DARPA的相关在研项目；② 由大学主导的“联合大学微电子项目”（JUMP），旨在提供2025—2030年所需的基于微电子的颠覆性技术；③ 由工业界主导的“第三页”（Page3）项目，针对“摩尔定律”未来可能走向极限情况提出了一些技术探索的方向[3]。

可以说，“电子复兴计划”的发布对美国下一代集成电路领域颠覆性技术发展至关重要，其政策体系和支撑路径同时引起了学术界和产业界的关注。因

此，本文从美国“电子复兴计划”技术识别机制、组织管理机制、评价机制、示范应用机制分析，试图解释进行颠覆性技术突破的规律（图1）。

1.1 技术识别机制

“电子复兴计划”将已有项目进行整合并凝练现实需求、广泛收集业界建议，逐步形成了多阶段、相互关联的发展计划，其技术识别过程主要分为技术愿景提出和技术愿景转化两阶段。

第一阶段：总结现实军事作战需求和新技术生长点，提出技术愿景。① 通过与国防部高层会晤和一线调研，深入分析未来可能面临军事挑战，从考虑未来战争的作战需求出发确定所需的前沿技术；② 通过与顶尖科学家交流研讨、对文献专利数据进行挖掘分析等方式发现世界最新前沿技术，并从中寻找可能对未来军事领域产生重大影响的新技术生长点。通过这种需求拉动和技术推动，提出要实现的技术愿景。

第二阶段：通过广泛调研、分析研讨等方法将技术愿景分解为一系列研究计划，最终转化形成项目选题。① 在业界峰会、媒体上组织宣传计划的背景、目标等。② 举办项目研讨会，由项目经理领导开展有针对性的讨论，邀请来自国防、产业界、科研单位等不同领域的专家学者，广泛听取他们对新兴技术需求和现存障碍的看法，并收集关于项目研发的目标和指标等建议，构思新的项目以满足“电子复兴计划”的目标。③ 参与者通过与DARPA合作支持“电子复兴计划”将双方共同感兴趣的研究计划转化为项目选题[4]。

1.2 组织管理机制

“电子复兴计划”重视发挥国家实验室、研究型



图1　美国“电子复兴计划”推动颠覆性技术研发与产业应用的机制

Figure 1　Mechanism of the United States' Electronics Resurgence Initiative (ERI) promotes R&D and industrial application of disruptive technologies

大学和科技领军企业的作用，组织成立政产学研合作联盟。合作联盟采取开放多元、相对市场化的协作模式，并围绕技术挑战进行成本分摊。在“联合大学微电子项目”中，DARPA 与工业界企业共同组成一个联盟，工业界成员包括产业界的 IBM、英特尔、台积电、三星电子和国防工业界的雷神、洛克希德 · 马丁等跨国科技企业。联盟成员共同拟定重点研究领域，共同为项目提供资金支持，同时持开放态度，欢迎更多的工业界赞助商加入。联盟通过向学术界征集提案成立 6 个研究中心，以推动半导体技术领域的探索性研究。另外，“电子复兴计划”对美国联邦政府资助的研发中心进行“直接竞争限制”，并优先鼓励私营部门投标。对于政府实体，如政府与国家实验室、军事教育机构等承担相关项目，必须出具书面文件以说明其符合招标条件，并明确表明该项工作私营部门无法提供。例如，桑迪亚国家实验室与大学和企业合作参加了极端可扩展性光子学封装、高端开源硬件等项目的研发；橡树岭国家实验室合作参加特定领域片上系统等项目的研发。在相对开放、市场化的合作联盟以外，美国“电子复兴计划”也注重培育相对封闭的项目研发共同体[5]，引导美国的空军研究实验室、陆军研究实验室、国立卫生研究院、能源部、海军研究办公室、微电子高级研究公司等军方用户和利益相关方共同参与研究，构建联合资助的合作网络。“电子复兴计划”采用的这种成本共担的合作联盟模式提高了协作攻关的效率，促进了政产学研深度合作；通过发挥各方优势将技术成果转化为现实生产力，有效应对半导体技术领域的挑战。

“电子复兴计划”采用项目经理人制度，项目经理人全权负责项目全流程[6,7]。通过与需求方和科学家的多次会议，项目经理人整合提出研究项目并选取研究团队。实施过程中，项目经理人可以中途停止项目并与项目共同退出——“电子复兴计划”中每年约有 20% 的项目经理人被淘汰。项目经理人被赋予极大的信任和权力的同时也承担了相应的责任；通过权责统一的制度设计，最大程度避免人情因素和集体决策无责任主体的弊端。

DARPA 通过多种方式对项目进度不确定性和经费损失等风险进行双重控制。“电子复兴计划”作为企业、大学和研究机构等多元主体开展的一系列前瞻性合作项目，研发难度大、风险高，只有在项目执行过程中采用动态化管理方式，培育开放包容的创新文化，进行多技术路线资助，安排完善的项目失败退出机制，才能分散并降低风险实现从基础创意到成果产出的跨越。① DARPA 组织定期会议并实行分阶段预算分配。项目组分为几个研究工作组，研究组再细分成不同的系统组；通过每周的研究组内部研讨会、每月的子系统碰头汇报会、每季度联席会议保证了项目的顺利推进，项目经理根据研究组的汇报情况调整预算。② 项目实施过程公开透明。项目经理可以随时采用更新、更优的技术方案，DARPA 每年大约有 20% 的技术方案被替代。在项目进展困难时公开向全社会征集解决方案，汇集新思想、新技术，从而推动创新。③ 采取多技术路线的竞争性资助。DARPA 会对采取不同技术路线研究相同问题的科学家分别进行资助，从而分散项目资助风险。④ 充分挖掘失败项目的价值。DARPA 对于当前科技水平无法完成的项目宣告失败后不会完全放弃，而是找出项目失败原因、保存项目过程中获得的技术知识，在未来有相关项目或项目重新具备再开发的条件时，以重新利用已经积累的有价值经验。

1.3 评价机制

“电子复兴计划”中项目提案的评审和遴选根据广泛机构公告（BAA）公布的评估准则进行。“电子复兴计划”启动后，举办项目研讨会并发布 BAA，随后在征集项目提案的过程中，根据 BAA 公布的评估标准对提案进行评选。在评估准则中有 2 点值得注意：① 要求提案提供技术转移计划，以说明该技术对国防

领域的影响、将新技术纳入国防系统的时间，以及技术向国防用户转移方式等问题；② 要求拟定的预算费用符合技术研发和实施管理的实际情况，并准确反映技术目标。

“电子复兴计划”中项目不同评估标准重要性有所不同。例如，“联合大学微电子项目”的提案评价标准按相对重要性从高到低依次为：整体的科技价值；独创性、新颖性和影响力；项目研究对联盟行业赞助商和DARPA需求的影响；研究人员的能力；成本效益，能否解决现实问题。提案的审查主要由项目经理和政府专家负责。项目经理会通过研讨会等形式与申请单位进行深层次的持续沟通，以确认技术路线的可行性。对初步符合条件的方案，要求申请人提交更详细的方案，并组织评审给出初步资助建议。最后，陆续公布项目执行者并启动项目。

在项目实施阶段的评价标准更加包容，能够包容客观因素导致的失败，如目前科技水平的限制、相关技术方案存在的潜在风险等。在评价周期上，短期内宽容失败，长期内要求有创新成果。

1.4 示范应用机制

对于不同类型的项目，DARPA采取不同的方式推进技术的应用推广。对于以军事应用为目的的项目，实施过程中全程与美国军方保持深度沟通；进入工程化与推广应用阶段后，相关企业与各军种签订合同，将进入试制生产阶段的产品提供给军方使用，通过这种方式将培育成熟的技术转移给军方。在军方订单能够维持企业研发和生产的情况下，吸引其他成熟企业进行投资并将产品推向市场。如果各军种不愿接受新培育的技术，DARPA可以运用国防部部长专用通道对新技术产品进行政府采购支持。对于以产业应用为目的的项目，实施过程中邀请产业界人士参与研讨会共同推进项目的应用化，直到有企业愿意对项目的成果转化进行投资，之后项目经理退出。项目通过在实施阶段和推广应用阶段与应用方进行深度沟通，推进了新培育技术的工程化与推广应用。

“电子复兴计划”于2019年发布了“电子复兴计划：国防应用”（ERI: DA）项目。该项目强调了国防过渡伙伴的作用，国防过渡伙伴是指具备向美国国家安全共同体交付技术能力的组织。ERI: DA项目要求参与者与国防过渡伙伴建立合作关系，推动“电子复兴计划”的技术成果在国防应用方面的开发示范；通过这种方式进一步明确了美国联邦政府在技术成果转化的过程中的持续作用，促进了技术成果在国防系统中的未来应用。

2 颠覆性技术驱动的未来产业培育研究框架

当前新一轮科技革命和产业变革正在兴起，以人工智能、物联网、虚拟现实和无人驾驶等为代表的颠覆性技术层出不穷，颠覆性技术开始受到越来越多的企业、公众重视，甚至成为世界各国的竞争焦点[8]。

颠覆性技术具有3个特征：① 技术创新过程复杂。颠覆性技术是技术的新组合或跨界应用，会破坏原有的技术轨道并形成新的技术轨道。② 破坏现有市场。颠覆性技术带来全新的服务或商业模式，破坏市场的既有竞争规则和现有需求。③ 产生新的产品及相应产业。颠覆性技术会开拓新的产品并形成相应的产业方向，从而改变人们的生产生活方式[9,10]。基于颠覆性技术的已有研究和特点，本文将其定义为“通过技术的新组合与跨界应用，对现有市场竞争格局产生破坏性冲击，带来新技术应用、产业业态与商业模式，改变甚至是创造了消费端的新需求”。

颠覆性技术通过全新的科学发现和对已有技术轨道的迁移，对该产业格局造成“创造性破坏”并培育了新的市场需求。因此，急需围绕未来产业培育的关键环节、模式功能、评价原则建立颠覆性技术驱动的未来产业培育模式研究框架（图2），并对其过程机制与内涵特征进行总结（表1）。在颠覆性技术供给环节，需要完善未来产业的任务选题机制，突出技术

遴选的需求导向和问题导向。*在技术产业转化环节*，明确政府和市场的责任分工，发挥政府资金的引导作用和放大效应。*在技术产业应用环节*，加强适合未来产业发展的需求侧政策举措。例如，管理部门增强国防、信息、能源和交通等基础设施对前沿技术产品的政府采购力度，为前沿技术转化提供早期培育市场，加快颠覆性技术的产业化应用迭代。

2.1 颠覆性技术方向识别

颠覆性技术作为驱动未来产业的引擎具有较强的不确定性，难以对具体技术进行准确的遴选与甄别。然而，笔者发现，对颠覆性技术方向与需求的预见与识别是可行的：一方面，虽然未来产业最终具体的产品形态和商业化应用时间很难预测，但可以根据技术的核心属性大致判断其主要的应用范围；另一方面，

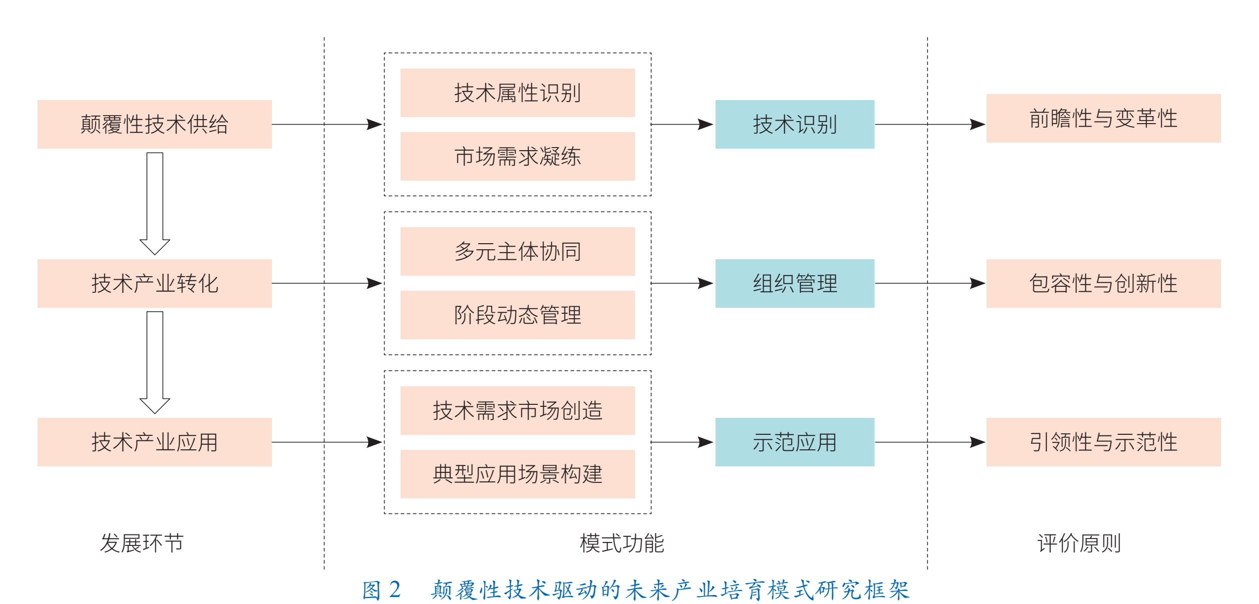


图 2　颠覆性技术驱动的未来产业培育模式研究框架
Figure 2　Research framework for future industry cultivation models driven by disruptive technologies

表1　颠覆性技术驱动的未来产业培育过程机制与内涵特征
Table 1　Mechanism and connotation of future industry cultivation driven by disruptive technologies

过程	关键内容
技术识别	**内涵特征：**颠覆性技术识别是与一般新技术识别原则、方法、关注重点不同的技术识别过程 **核心需求：**颠覆性技术作为驱动未来产业的引擎具有前瞻性和不确定性，结合技术核心属性与现实需求识别颠覆性技术十分重要 **实践模式：**颠覆性技术识别方法主要可分为德尔菲法与技术路线图相辅、构建评估指标与识别模型、专利数据及文献挖掘3类
组织管理	**内涵特征：**颠覆性技术的组织强调创新主体、创新资源、创新环境的充分耦合互动激发创新活力，管理具有动态性，科学有效 **核心需求：**传统的科技计划管理难以满足颠覆性技术的管理需求，需要创新组织管理模式解决资源配置和人事管理等方面面临的组织机制障碍 **实践模式：**多元主体协同的组织模式和动态的管理模式
评价模式	**内涵特征：**与传统评价模式不同关注重点不同，适合“高风险、高回报”的颠覆性技术评价模式 **核心需求：**颠覆性技术的评价模式需要顺应其发展规律、激发创新活力 **实践模式：**营造创新氛围的容错机制、优化以同行评议为核心的传统评审方式、创新评审标准
示范应用	**内涵特征：**加大对颠覆性技术的投入，推动其产业化应用，从而促进未来产业发展 **核心需求：**颠覆性技术领先于现有市场，需要相应的新市场需求；其路线和前景的不确定性，需要培育试点示范区 **实践模式：**政府国防部门采购、构建典型应用场景（如先导示范区）

人类对温饱、安全、交流、舒适、健康、发展等需求不断提高，颠覆性技术须能够有效满足市场需求。从人类的基本需求出发，结合对技术核心属性的大致判断，可以对颠覆性技术的方向进行展望。同时，在颠覆性技术方向和需求的预见识别中需要防止点错“科技树”。基于颠覆性技术自身发展的特征与趋势进行战略判断，特别是需要注意规避美国可能对我国技术发展实施的战略诱导与误导。

颠覆性技术更加注重前瞻性和变革性[11]。在颠覆性技术发展初期往往需要巨大的研发投入以实现产业化，要面向未来前瞻布局，抢占“无人区”，满足国家的重大战略需求；还要能广泛应用于产业领域并具有长远的应用价值，满足国家经济发展的需要。另外，颠覆性技术作为革命性力量，往往会颠覆已有产业体系运营模式。例如，美国 SpaceX 公司通过掌握领先的火箭一级回收技术、整流罩回收技术、模块化组装技术和可重复使用技术，实现“猎鹰 9 号”火箭回收的颠覆式创新，大幅降低发射成本，对现有运载火箭产业格局及龙头企业造成巨大冲击。

目前已有的颠覆性技术识别方法可分为 3 类。① 通过德尔菲法辅以技术路线图，或者“水平扫描”调查方法，来判断技术的颠覆性。此类方法充分考虑到影响颠覆性技术发展的多种因素，具有可视化和结构化等优势，是颠覆性技术预见的最有效方法之一。② 从企业实践的角度出发，根据颠覆性技术的共性特征与应用效果构建评估指标与识别模型，并通过案例分析验证模型的有效性。此类方法以颠覆性技术的性能价值与市场影响力为依据进行技术预见，具有简单高效的优点。③ 利用文献引用关系、共现关系等方法对技术领域的专利、论文进行数据分析来识别颠覆性技术。此类方法以技术孕育发展的文献线索为依据识别潜在的颠覆性技术，更加客观细致。

2.2 组织管理

*颠覆性技术创新影响众多主体、领域、产业，需要运用开放多元的思维进行组织创新。*颠覆性技术的创新模式不再是传统的线性和链式模式，呈现出间断性和跨越性的特征，并逐步演变为多元主体协同的创新模式。依靠军方或产业界单一的创新资源较难取得突破。因此，需要调动政府、军方、民营企业、大学和科研院所等各创新主体的研发力量，加强多方的互动和协同，在一个共同体中最大限度地发挥科技资源配置效率和技术创新的协同效应，从而降低颠覆性技术发展的风险和不确定性，提高创新的效率和效益。

*颠覆性技术创新性极强，对已有传统或主流技术产生颠覆性效果，传统的科技计划管理难以满足颠覆性技术的管理需求。*传统科研管理项目组织程序规范，但管理人员权力有限，重要事项依赖集体决议，导致行政审批程序多、时间长；而颠覆性技术具有较强时效性，长时间的审批程序可能错失颠覆性技术的发展机遇。大学、科研院所等学术机构进行了颠覆性技术创新研究但成果转化成本高昂，产业界更注重应用性研究，缺乏对基础性、原创性研究的投入，这导致两者之间技术转移困难，严重影响颠覆性技术创新的效率。在多元主体协同的组织模式中，涉及各参与部门、机构之间的数据共享、知识产权、利益冲突，以及跨组织的员工管理等复杂问题，需要通过制定关于资源配置和人事管理等方面的合作协议克服组织机制中的障碍。因此，需要由军方、大学、科研院所、企业及中介机构等组成的创新主体，利用由人才、技术、资金、信息和管理等组成的创新资源，在相应制度、政策、文化和金融等构成的创新环境下，以颠覆性技术突破为共同目标，围绕公共问题、公共利益和公共需求进行技术的合作、共享、转移和创新，激发创新活力。

*颠覆性技术研发难度大、具有动态变化性，需要动态的管理模式。*管理方式应根据任务重点、内外部环境及评估反馈等因素，在颠覆性技术的不同发展阶段不断调节管理方式和重点，从而保障管理的科学性

和有效性。动态的管理模式能避免因早期过于严格的干预而错失颠覆性技术创新的机会，又能防止因管理过于宽松而出现“搭便车”、投机等行为带来的负面效应。同时，需要通过建立多种技术路线并行的颠覆性技术竞争与退出机制，以避免在错误的技术路线上过多投入资源，延误产业发展的战略时机。

2.3 示范应用

颠覆性技术作为前沿技术的一部分，其产业化对未来产业的发展十分重要。加大对颠覆性技术研发投入，推动颠覆性技术及相关互补技术的创新迭代，加快技术的产业化应用是培育和壮大未来产业重要手段之一。由于颠覆性创新领先于现有市场，没有现成的市场需求，技术成果能否被市场短时间接受事关技术创新的成败[12]。因此，为新技术创造新的市场需求是颠覆性技术创新最终取得成功的重要保障。例如，政府通过“有形的手”增强国防军队用户、能源和交通等基础设施管理部门对颠覆性技术产品的采购力度；将研发项目与国家战略需求相结合，推进太空探测、深海探测等集成前瞻技术的重大工程，为颠覆性技术向未来产业的转化提供早期市场，加快前沿技术的产业化应用迭代。

探索构建典型应用场景、培育发展颠覆性技术的试点示范机制和新模式，发挥其引领性、示范性作用，对于统筹推进和突破颠覆性技术、加快其成果转化与产业化具有十分重要的意义和价值。颠覆性技术创新具有很强的不确定性。由于路线和前景的不明确，它从理论构想的孵化阶段进入技术产业规模化阶段比一般技术创新阻力更大，需要以推动重大科技创新为核心、以创新体制机制为主攻方向，前瞻布局和重点建设示范区，推动颠覆性技术应用，从而进一步集聚科技创新资源，强化创新主体合力，建设产业创新生态，构建典型应用场景。例如，培育发展未来产业的先导试验区，是开展系统性整体性协同性先行先试的一种新组织模式；是统筹推进科技、需求、业态、组织、政策融合创新，提升科技资源配置、人才供给、金融资本、知识产权、政策支持的效率和效益，促进科研、科教和科创融合的综合性基地；也是加快形成我国未来产业发展的新引擎。

2.4 评价模式

颠覆性技术具有非常大的不确定性与风险性，呈现“高风险、高回报”的特点，急需形成注重创新、包容失败的评价理念，改革传统的评价模式。① *颠覆性技术需要具有包容性能够营造活跃的创新氛围的容错机制*。因此，因技术路线选择或其他不可控因素，导致无法达到既定的研究目标，应进行适当包容。对于因研究本身不确定性导致的项目终止与因学术不端导致的研究失败进行追责，从而营造敢为人先、勇于挑战的创新氛围，激发颠覆技术创新活力。② *创新以同行评议为核心的评审方式*。高风险探索性创新研究的知识范围往往不拘泥于某一特定的学科领域，聘请来自多学科的专家评议有助于从多学科角度评价项目；邀请不同领域的研究人员组成讨论小组并参加研究计划的研讨会，研讨会作为实时评议的平台有助于参与者间的相互协作、激发灵感；申报人与评审专家进行多轮沟通互动的扶优式评审，能够在交互中共同孵化出颠覆性创新项目。③ *优化评审标准*。以创新性、前瞻性和变革性作为判断颠覆性技术的主要标准，评审重点放在研究的立项依据是否充分，以更好地适应颠覆性技术高风险探索性的特征。同时，参考美国“电子复兴计划”在项目评价中每年淘汰20%的项目和项目经理的运营模式，建立多种技术路线并行、公开透明的技术竞争与退出机制。

3 结语与启示

前瞻布局颠覆性技术是提升我国原始创新能力、加快实现高水平科技自立自强的关键保证。要充分发挥市场化环境下市场机制和政府作用有机结合的优势，动员政府、企业、大学、科研院所等各方力量，

实现政产学研协同攻关[13]。依托国家实验室、国家科研机构、高水平研究型大学、科技领军企业等战略科技力量，通过探索建立适合的组织模式和管理机制，加强颠覆性技术的多路径探索、交叉融合和源头供给，打造未来产业策源地。

3.1 面向未来产业培育建立长期、动态的颠覆性技术甄别与支持机制

*① 建立未来产业长期支持机制。*目前，我国大多处于产业生命周期初创孕育期，一般需要5—10年甚至更长时间才能够成长为主导产业。充分考虑未来产业培育周期较长的特性，需要明确政策支持的方向与重点，形成产业政策长期持续支持机制。*② 建立针对颠覆性技术的动态甄别机制。*当前全球范围内，各国围绕类脑智能、量子信息、基因技术、未来网络、深海空天开发、氢能与储能等方向积极布局，其关键领域有可能成为未来产业培育与孵化的重要突破口；我国急需提升对最新科技突破及应用的敏感性，在国家层面建立颠覆性感知响应体系，成立未来产业发展战略咨询专家组，密切跟踪人工智能、量子信息科学、生物技术等未来产业领域的发展趋势及动向，形成对于未来产业的技术甄别机制。

在集成电路领域，随着集成电路产业“摩尔定律”趋于逼近物理极限，全球在下一代集成电路发展中出现了多种演化路线，以光子芯片、碳基芯片等为代表的技术成为重要发展方向——美国、欧盟、日本等国家和地区均加强在以光子芯片为代表的下一代集成电路领域的布局。我国急需对全球下一代集成电路领域的技术创新前沿进行系统跟踪，对于我国相关技术基础和技术未来发展趋势等进行多维评估，建立系统有序的长期支持机制。例如，加强对于碳基芯片、硅光子芯片等颠覆性技术的长期支持机制，同时充分考虑下一代集成电路在技术路线、产品形态、产业化等多方面的不确定性，建立动态支持与退出机制。

3.2 强化市场导向、多元参与的管理模式与政策设计

依托我国重大应用场景实施快速敏捷的激励机制，带动大、中、小企业等市场主体进行未来产业技术创新与应用。*① 搭建市场应用与国防需求间的桥梁。*借鉴美国“电子复兴计划：国防应用”项目中“国防过渡合作伙伴”作为桥梁连接民间创新技术与国防应用的方式，以国防科技工业技术转移中心为基础，加强与重点科技创新企业、大学和科研院所合作，打破市场与国防的围墙与藩篱，让市场的创新力量深度参与面向国家重大需求的未来颠覆性技术研发。建立面向国家重大战略需求的颠覆性技术转化机制。在国家层面成立“未来产业源头技术攻关办公室”，由企业面向国家重大技术攻关需求向该办公室提出技术方案，促进相关技术成果在前沿领域的应用对接。*② 持续挖掘公共采购部门和产业内相关企业发展共性技术挑战。*由大学、科研院所与企业合作进行技术研发，培育相关领域产学研合作联盟；在商业化的初期由政府采购产业运营的需求侧支撑，并支撑进行产品的持续迭代与优化。

在下一代集成电路领域，亟待加强国家层面对于下一代集成电路产业各环节技术攻关进行整体统筹与系统支持。单台集成电路设备涉及零部件达上万种，材料体系庞杂，需要产业链上零部件企业、设备企业、设计企业的系统协调与协同攻关。因此，需要从国家层面充分调动科研院所、大学，以及产业链各环节企业进行合力攻关，推动下一代集成电路产业设备、材料、制造工艺各环节形成紧密耦合机制。

3.3 建立多种技术路线并行的颠覆性技术的竞争与退出机制

搭建公开透明的竞争平台，形成多种技术路线并行的竞争机制，实行多阶段动态管理并完善项目退出机制。*① 在项目进展过程中实施动态管理。*通过开展阶段性研讨会、针对相同研究主题的不同技术路线平行竞争、研发过程向公众公开征集解决方案等方式不断将

新思想吸收到项目中，然后根据项目进展情况做出继续、调整甚至替换等决策，从而保持目前技术方案的先进性和可行性。② 针对项目研发成功和失败2种情况提前制定相应的机制安排。在立项时对技术成果的应用目标、项目成果转化接收方、研发方退出时间、利益分配等进行明确的规划。对于失败的项目建立处置预案，对于现有科技水平无法满足、研究方向无法实现的项目，在停止后应找到失败原因、总结研发过程中的技术知识，为以后的相关项目或条件成熟时重启项目做好准备。通过灵活开放的项目竞争评审机制与利益分配机制有效控制整体研发投入风险。

3.4 建立针对颠覆性技术研发与产业化的多元化评价机制

与关键核心技术攻关的“揭榜挂帅”的考核评价机制不同，面向未来产业的颠覆性研发与产业化的目标和需求相对模糊，创新过程复杂、风险大。① 建立针对颠覆性技术的评价指标体系以筛选有潜力的技术。在项目遴选阶段，政府和企业可以尝试建立科学的颠覆性技术评价指标体系，再由专家结合自身经验在分析的基础上对技术进行评价，从而遴选有潜力的颠覆性技术并进行前瞻性跟踪培育。② 采取多元化评价机制降低项目风险、促进创新产出。在颠覆性计划项目实施过程中，赋予项目负责人足够大的决策权和相应的责任，权责统一，最大程度避免人情因素导致的资源错配。包容由于技术研发、技术路线等客观因素导致的失败；同时，加强过程管理并采用客观的第三方独立评估。邀请不同领域的专家从科研、市场、成本等多个角度对项目进行评估并形成评估意见，从而解决科技计划管理中普遍存在的重视立项评审、忽视过程管理、轻视成果转化等问题[14]，以更好地促进颠覆性技术项目实施过程中的风险消减，以及创新成果的产业化。

3.5 完善面向未来产业的颠覆性技术的示范应用

① 综合考虑各地布局，开展未来产业应用场景试点工作。立足国家长远和全局发展，统筹考虑各地已布局的未来产业，选择数字化、智能化等发展基础较好，具备一定组织经验和基础研究能力的城市，重点围绕类脑智能、量子信息、基因技术等颠覆性技术开展试点示范，以应用示范带动产业发展。同时，逐步探索未来产业先导试验区等试点示范，推动各地方政府在资金、土地、税收、人才等方面对建设未来产业应用场景提供政策支持，培育一批具备一定国际竞争力的未来产业。探索建立从立项阶段将应用方纳入整个项目研发过程的研发机制，确保科学研究与需求紧密结合，提高研究成果转化和应用的成功率。② 充分发挥学术界作用，开展未来产业相关研究，为技术成果转化应用提供决策支撑。推进国家“双一流”“强基计划”等大学建设，加强对未来产业专业人才培养，满足未来产业发展需求。营造未来技术研究氛围，通过举办全球性论坛等活动，鼓励科学家开放性地探讨颠覆性技术研究的方向和路径，加强颠覆性技术多路径探索和供给，大力推动技术群体突破。发挥专业智库优势，开展关于未来技术预测产业的研究，加强对未来技术预测、研发、成果转化应用和未来产业发展的决策支撑。

在集成电路领域，推动我国自主下一代集成电路产品在金融、能源、航空等国家安全需求场景，制造、电信等面向国际竞争的产业场景，以及智慧城市、医疗等与民生消费紧密相关领域的应用。特别在人工智能芯片领域，重视在重大科技工程、大科学装置的规划和评审过程中，引导使用自主核心技术，加大采购国产计算、存储和人工智能（AI）服务器力度，对采用我国自主芯片的项目给予优先和优惠政策支持。

参考文献

1 盛朝迅. 决胜未来产业. 中国中小企业, 2021, (5): 68-69.
Shen C X. Winning in the future industry. China Small &

Medium Enterprises, 2021, (5): 68-69. (in Chinese)

2 李铁成, 李茜楠. 从美国“电子复兴计划”新阶段部署看我国电子业创新技术转移. 中国集成电路, 2019, 28(6): 22-32.
Li T C, Li Q N. Looking at the innovation technology transfer in China's electronic industry from the new stage of the America's Electronics Resurgence Initiative. China Integrated Circuit, 2019, 28(6): 22-32. (in Chinese)

3 朱晶. 集成电路前沿技术趋势研判及对北京的启示. 电子技术应用, 2021, 47(12): 51-56.
Zhu J. Development trend of integrated circuit cutting-edge technology and its enlightenment to Beijing. Application of Electronic Technique, 2021, 47(12): 51-56. (in Chinese)

4 王丽, 于杰平, 刘细文. 美国电子复兴计划进展分析与启示. 世界科技研究与发展, 2021, 43(1): 54-63.
Wang L, Yu J P, Liu X W. Analysis on progress of DARPA Electronics Resurgence Initiative and its inspiration. World Sci-Tech R & D, 2021, 43(1): 54-63. (in Chinese)

5 杨芳娟, 梁正, 薛澜, 等. 颠覆性技术创新项目的组织实施与管理——基于DARPA的分析. 科学学研究, 2019, 37(8): 1442-1451.
Yang F J, Liang Z, Xue L, et al. Research on the implementation and management of disruptive technological innovation project: Based on the analysis of DARPA. Studies in Science of Science, 2019, 37(8): 1442-1451. (in Chinese)

6 窦超, 代涛, 李晓轩, 等. DARPA颠覆性技术创新机制研究——基于SNM理论的视角. 科学学与科学技术管理, 2018, 39(6): 99-108.
Dou C, Dai T, Li X X, et al. Research on DARPA's disruptive technological innovation mechanism: Based on the perspective of SNM Theory. Science of Science and Management of S.&T., 2018, 39(6): 99-108. (in Chinese)

7 韩芳. 美国DARPA电子复兴计划的解读及启示. 中国集成电路, 2019, 28(Z1): 19-27.
Han F. Interpretation and enlightenment of the DARPA's Electronics Resurgence Initiative in the United States. China Integrated Circuit, 2019, 28(Z1): 19-27. (in Chinese)

8 Koulopoulos T, Achillias G. Revealing the Invisible: How Our Hidden Behaviors Are Becoming the Most Valuable Commodity of the 21st Century. US: Post Hill Press, 2018.

9 沈华, 王晓明, 潘教峰. 我国发展未来产业的机遇、挑战与对策建议. 中国科学院院刊, 2021, 36(5): 565-572.
Shen H, Wang X M, Pan J F. Opportunities, challenges, and recommendations for development of future industries in China. Bulletin of Chinese Academy of Sciences, 2021, 36(5): 565-572. (in Chinese)

10 曹晓阳, 魏永静, 李莉, 等. DARPA的颠覆性技术创新及其启示. 中国工程科学, 2018, 20(6): 122-128.
Cao X Y, Wei Y J, Li L, et al. Enlightenment of disruptive technological innovation of DARPA. Strategic Study of CAE, 2018, 20(6): 122-128. (in Chinese)

11 王学昭, 甘泉, 王燕鹏, 等. 颠覆性技术创新的前瞻性治理. 中国科学院院刊, 2020, 35(5): 620-628.
Wang X Z, Gan Q, Wang Y P, et al. Forward-looking governance on disruptive technology innovation. Bulletin of Chinese Academy of Sciences, 2020, 35(5): 620-628. (in Chinese)

12 许泽浩, 张光宇, 黄水芳. 颠覆性技术创新潜力评价与选择研究：TRIZ理论视角. 工业工程, 2019, 22(5): 109-117.
Xu Z H, Zhang G Y, Huang S F. A research on disruptive technology innovation potential evaluation and selection: Perspective of TRIZ. Industrial Engineering Journal, 2019, 22(5): 109-117. (in Chinese)

13 余江, 刘佳丽, 甘泉, 等. 以跨学科大纵深研究策源重大原始创新：新一代集成电路光刻系统突破的启示. 中国科学院院刊, 2020, 35(1): 112-117.
Yu J, Liu J L, Gan Q, et al. Major original innovation based on interdisciplinary research: International insights from breakthrough of new generation of lithography system. Bulletin of Chinese Academy of Sciences, 2020, 35(1): 112-117. (in Chinese)

14 彭春燕. 日本设立颠覆性技术创新计划探索科技计划管理改革. 中国科技论坛, 2015, (4): 141-147.
Peng C Y. The exploration of Japan in scientific and technological management reform through setting up disruptive technological innovation plan. Forum on Science and Technology in China, 2015, (4): 141-147. (in Chinese)

Cultivation Mode and Path of Future Industries Driven by Disruptive Technologies

—Enlightenment of the United States' Layout of Next Generation of Integrated Circuit Industry

ZHANG Yue[1,2] YU Jiang[1,2*] YANG Ya[1,2] CHEN Feng[2]

(1 Institutes of Science and Development, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, China;

2 School of Public Policy and Management, University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

Abstract Disruptive technologies have key impact on the path, direction, and international competition pattern of future industrial development, so the forward-looking layout of future industries driven by disruptive technologies is an inevitable choice for China to seize the commanding heights of science and technology and accelerate the construction of a new development pattern. Based on the in-depth analysis of the whole process and whole chain of the United States' Electronics Resurgence Initiative layout of disruptive technologies and the technology identification mechanism, organization management mechanism, evaluation mechanism, and demonstration application mechanism of cultivating future industries, this study extracts the scientific connotation and key elements of disruptive technologies and future industries, and constructs the research framework of "disruptive technology-driven future industry cultivation model" from the links of "disruptive technology supply-technology industry transformation-technology industry application". Relevant research findings have key reference significance for China's cultivation of future industries driven by disruptive technologies. This study proposes that China should establish a long-term and dynamic disruptive technology identification and support mechanism for future industries, further strengthen the market-oriented and multi participation management model and policy design, establish a dynamic comparison and competitive exit mechanism of disruptive technologies with multiple technical routes in parallel, tolerate failures caused by objective factors such as technology research and development and technical routes, form an assessment and evaluation mechanism differentiated from the key core technology research, improve the demonstration and application of disruptive technologies for future industrial application scenarios, and promote pilot demonstrations and application scenarios such as future industry pilot demonstration zones.

Keywords disruptive technology, future industry, Electronics Resurgence Initiative, frontier deployment path

张 越 中国科学院科技战略咨询研究院副研究员。主要研究领域：国家科技政策、产业创新生态系统。E-mail: zhangyue@casisd.cn

ZHANG Yue Associate Professor at Institutes of Science and Development, Chinese Academy of Sciences (CAS). Her research interests include national science and technology policy and industrial innovation ecosystem. E-mail: zhangyue@casisd.cn

余 江 中国科学院科技战略咨询研究院研究员，中国科学院大学公共政策与管理学院教授、博士生导师，主要研究领域：新兴技术与产业化、产业创新管理与竞争战略。E-mail: yujiang@casisd.cn

YU Jiang Professor at Institutes of Science and Development, Chinese Academy of Sciences (CAS), as well as Professor at School of Public Policy and Management, University of Chinese Academy of Sciences. His research interests include emerging technology and industrialization, and industrial Innovation management and competitive strategy. E-mail: yujiang@casisd.cn

■责任编辑：岳凌生

*Corresponding author